

文章编号: 1006-4362(2024)02-0056-08

世界遗产元阳梯田加固田埂降雨侵蚀机理研究

黄博^{1,2,3}, 陈安^{1,2,3*}

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 昆明 650093;

3. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 昆明 650093)

摘要: 世界遗产元阳梯田老虎嘴观景台下方发生滑坡-泥石流地质灾害并冲毁梯田约 9.79 hm²。为了加固田埂、修复梯田, 通过室内模型试验, 分析模拟降雨条件下不同田埂注浆加固工况的梯田模型侵蚀发育情况和模型内部体含水率、孔隙水压力、基质吸力、土压力变化规律及其坡面流速、产流产沙特征, 以研究降雨条件下注浆固埂侵蚀机理。结果表明: 注浆固埂增强了田埂截流作用, 其具有减水减沙效益, 并且对于细沟发育有调控作用。注浆固埂减缓梯田侵蚀发展速度, 不改变其侵蚀发展模式。注浆固埂的减水减沙效益随雨强增大而减小。

关键词: 元阳梯田; 田埂加固; 侵蚀机理

中图分类号: P694; S157; TU411 **文献标识码:** A

STUDY ON MECHANISM OF RAINFALL EROSION REINFORCEMENT IN WORLD HERITAGE YUANYANG TERRACE FIELD

HUANG Bo^{1,2,3}, CHEN An^{1,2,3}

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Kunming 650093, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming 650093, China)

Abstract: The geological disaster of landslide-debris flow occurred beneath the viewing platform of the Yuanyang terrace, a world heritage site, resulting in the erosion and loss of 146.8 mu of terrace area. To reinforce the ridge and restore the terrace, an investigation was conducted on the grouting reinforcement mechanism under rainfall conditions through indoor model testing. This study analyzed the erosional development, variations in internal volumetric water content, pore water pressure, matrix suction, and soil pressure, characteristics of flow and sediment yield, as well as characteristics of overland velocity. The findings revealed that; grouting reinforcement enhances the blocking effect of the ridge, which has the benefit of reducing water and sediment, and has the regulation effect on the development of rill. The grouting and reinforcement of terraced fields slow down the erosion development speed and do not change the erosion development mode. The benefit of water and sediment reduction of the grouting and reinforcement decreases with the increase of rain intensity.

Key words: the Yuanyang terraces; ridge reinforcement; erosion mechanism

1 前言

世界遗产元阳梯田牛角寨乡良心寨村良心寨组、攀枝花乡老虎嘴梯田片区均曾发生过滑坡-泥石流灾害,大面积梯田遭受不同程度的损毁。同时梯田区内滑坡灾害隐患点有 12 处。为了恢复梯田、防止梯田再次发生损毁,需对梯田田埂进行加固并研究梯田降雨侵蚀演化规律及其机理。

梯田作为一种水土保持措施能极大减少侵蚀发生^[1]。窦玉青在统计并分析不同地点梯田的减沙效益的基础上,对梯田的防蚀机理进行了理论上的分析,最终得出了梯田防蚀是通过减缓田面径流流速与减少径流而达到的^[2]。Qihua Ran 基于物理的分布式水文模型提出了梯田使原本斜坡的侵蚀规律产生改变,大幅减少径流^[3]。但是梯田的蓄水保土能力是有限的,与降雨、梯田质量等因素有关^[4]。吴发启等认为当降雨量、雨强处于一定范围内时,梯田具有很高的蓄水保土效益,但是随着降雨量、雨强的增大梯田蓄水保土效益降低^[5]。徐乃民通过分析各地小区观测资料提出梯田有没有田埂对其减水减沙效益的影响很大,尤其是减水效益的影响,但随着降雨量的增加,有埂梯田的减水减沙效益也在减小^[6]。经过长期生产实践证明,田埂经过长期的侵蚀,使得梯田蓄水保土能力降低^[7-9]。在极端降雨情况下,降雨强度大于田面入渗能力,当田面积水高度大于田埂高度时梯田产生漫溢,梯田发生严重的土壤侵蚀、坡面侵蚀现象^[10-11]。坡面流形成后,坡面侵蚀的强度取决于地表径流势能和土壤的抗蚀能力^[12]。细沟侵蚀作为土壤侵蚀由面蚀转为沟蚀的过渡阶段,在土壤侵蚀研究中具有不可替代的价值,影响细沟侵蚀的因素有很多,其中最直接的因素就是径流^[13]。田埂对于梯田侵蚀的调控主要就是通过自身的截流作用来实现的,截留率与田埂质量成正比,随着降雨的持续截留量趋于变小,由于降雨强度不变,截留量降低,截留率就会降低,侵蚀速率就增大。所以对于田埂加固侵蚀机理的研究是十分必要的。

V. H. Durán Zuazo 通过分析西班牙某果园密集种植区 2001~2002 年期间的土壤流失和径流数据,认为尽管采取了果园梯田这一水土保持措施,但水土侵蚀仍然是这些陡峭高地的主要问题^[14]。刘斌涛分析了有关西南土石山区水土保持措施的观测资料得到了不同水平梯田类型对水土保持措施因子(P 值)的影响^[15]。严登峰通过研究红壤坡地果园,分析了 5 种不同水土调控影响措施总结各措施的侵蚀机理^[16]。目前针对降雨侵蚀机理的研究大多基

于观测径流小区,通过分析不同情况的小区降雨侵蚀发育特征进行机理研究,基于室内模型试验进行的且单独针对梯田的侵蚀机理研究较少。学者们对植被水土保持措施的侵蚀调控机理也进行了较多研究^[17-18],结果表明不同种类植被的水土保持能力参差不齐,即使效果较好的林草植被在生长早期也完全不具减沙条件。相较于植物措施,田埂注浆后养护周期短,确定注浆材料类型后减水减沙效果较为稳定,但对于注浆固埂侵蚀机理的研究较薄弱。本研究通过分析模拟降雨下不同水灰比浆液注浆固埂工况模型侵蚀发育情况、体积含水率、土压力、孔隙水压力、基质吸力数据变化规律、产流产沙特征和坡面流速变化来研究注浆固埂的降雨侵蚀机理。

2 模型试验研究

2.1 地质灾害及地质背景

如图 1 所示,2018 年 6 月 26 日世界遗产元阳梯田老虎嘴观景台下方发生了滑坡-泥石流链式地质灾害,损毁约 9.79 hm² 梯田,老虎嘴景区被迫关闭。老虎嘴滑坡长 167.0 m,平均宽度 87.0 m,滑坡体平均厚度 7.0 m,为中型、浅-中层、推移式滑坡;滑坡诱发泥石流长约 850 m,宽 15~150 m,厚约 0.1~5.0 m 不等。元阳梯田地处云南高原中亚热带山地季风气候区,年平均降雨量 1 397.6 mm,每年降雨多在 6 月,为 257.9 mm,最少在 2 月,为 34.1 mm。降水集中在 5~10 月,春季降水较少。滑坡区地形两侧高,中间相对低洼,下方为景区核心梯田。滑坡坡向 240°,地形坡度 20°~40°,坡面不平整,局部近似直立。地质灾害区地层主要有第四系耕植土、第四系残坡积层粉质黏土(厚 2.8~6.90 m)、元古界哀牢山群阿龙组全风化片麻岩。



图 1 滑坡-泥石流全貌图

2.2 试验方案

试验设置 3 种水灰比浆液注浆固埂工况和 2 种

模拟降雨条件如表 1 所示。记开始降雨时刻为实验开始时刻,具体方案如下:

侵蚀发育监测。降雨开始后每隔 5 min 记录一次细沟长度。当出现细沟后,记录细沟出现时间和发育位置。

传感器监测。开始降雨后所有传感器每隔 5 min 读取一次数据。

产流产沙监测。开始降雨后首先记录产流时刻,并且每隔 5 min 用 1 l 容量的容器接收径流泥

沙,如果 30 s 内收集的产流不够 1 l 时停止收集,记录 30 s 内收集到的产流量;30 s 内收集的产流量超过 1 l,则记录产流 1 l 所用的时长。对样品进行编号,依次进行直至降雨结束。试验完成后对样品进行静置、烘干、称重来分别计算出每个测量时刻的产流产沙量。

坡面流速监测。开始降雨后每隔 15 min 在模型上释放一次示踪剂,并通过高速摄像机监测示踪剂的流动速度来代表坡面流速。

表 1 试验工况

模型槽	浆液水灰比	降雨强度 $q/\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	降雨历时/h	侵蚀发育监测	传感器监测	产流产沙监测	坡面流速监测
1	0.8	60	2	√	√	√	√
2	—	60	2	√	√	√	√
3	0.5	60	2	√	√	√	√
1	0.8	120	2	×	×	√	√
2	—	120	2	×	×	√	√
3	0.5	120	2	×	×	√	√

注:—表示不注浆;√表示进行;×表示不进行。

2.3 试验装置

试验装置包括模型槽、模拟降雨系统和传感器如图 2 所示进行布置,各装置具体如下:

(1) 模型槽。模型槽位于人工模拟降雨场地,模型槽分 3 个小槽,左右两侧为 $3\ 000\ \text{mm} \times 500\ \text{mm} \times 500\ \text{mm}$ 的两个小槽,中间为 $3\ 000\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm} \times 500\ \text{mm}$ 的大槽,并在原模型槽基础上增加 7 块隔板,使得模型堆积高度满足试验条件并且梯田整体坡度满足要求,模型槽前端有收集径流泥沙的出水口。

(2) 模拟降雨系统。本次模型试验降雨选用中仪人工模拟降雨系统进行实现,通过操作系统进行喷头和压力选择来实现预设降雨量,降雨强度即降雨量除以降雨范围面积除以降雨历时,降雨高度为 4.5 m,在正式试验前对降雨强度进行标定,并且保证测试结果符合降雨均匀性要求。

(3) 传感器。此次试验中共埋设 4 种传感器每种各 6 个,分别为体积含水率传感器、土压力传感器、孔隙水压力传感器、基质吸力传感器。

2.4 模型制作及参数选取

制备模型所使用的土体为直接取自研究区现场的第四系残坡积层粉质黏土,土体的基本参数指标如表 2 所示,模型的尺寸如图 3 所示。

表 2 土体物理力学指标

土体	天然重度 r / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	含水率 $\omega/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
粉质黏土	18.8	25.6	33.9	10.0

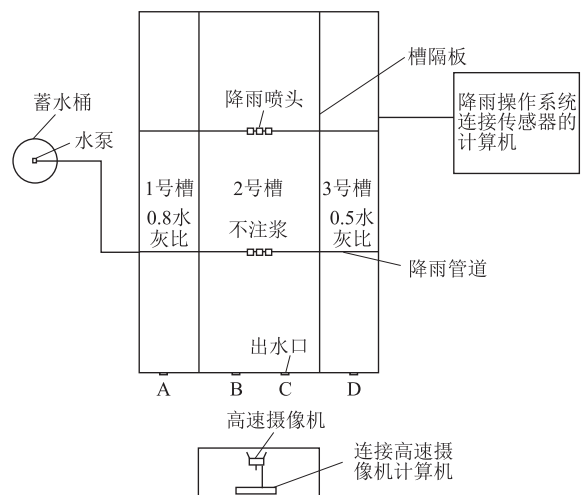


图 2 设备布置

根据研究区实际工程地质条件,考虑相似性原理。设置模型地形坡度 15° ,布置 9 级梯田,第一级梯田上方为 10° 的斜坡模拟自然斜坡,田面宽 300 mm,田坎高 80~100 mm。首先在模型槽内铺设 20 cm 厚的透水性良好的垫层土,并进行压实,然后将现场采集的粉质黏土进行过筛网的处理,并进行摊铺、翻晒。通过分层击实填筑法,将处理好的土样每隔 10 cm 为一层填筑在槽内垫层之上,每层填土体都采用人工手动夯实的方法进行压实,使每层填土的参数与初始参数(参见表 2)保持一致,填筑好后进行人工削坡。传感器埋设位置如图 3 所示,以槽号、传感器种类、传感器编号进行命名如 1W1。

使用 0.5 水灰比和 0.8 水灰比浆液在 1 500

mm×1 500 mm×700 mm 模具中对现场土样进行注浆,注浆浆液材料选用纯水泥浆液,控制注浆压力为 0.45 MPa,注浆完成后立即对浆液扩散半径范围内 2 倍管径处注浆土体进行取样。用 0.8 水灰比注浆样品在 1 号槽中的梯田模型上修筑田埂,用不进行注浆的土样修建 2 号槽的梯田埂,用 0.5 水灰比注浆样品在 3 号槽内修筑梯田田埂,控制田埂高度为 30 mm,模型制备好后养护 24 h,梯田模型如图 4 所示。

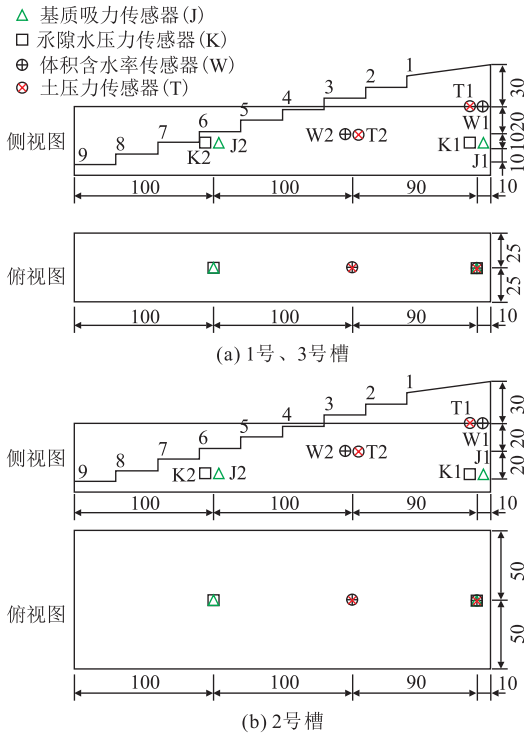


图 3 模型尺寸传感器布置图



图 4 梯田模型

3 试验结果与分析

3.1 侵蚀发育情况

细沟发育总是伴随侵蚀产流产沙过程,细沟形态迅速演变,细沟形态演化过程与侵蚀过程是互相

影响的耦合过程^[19-20]。沟壁的崩塌、侧蚀具有较强的随机性,而细沟的溯源侵蚀能较好地代表细沟的发育过程^[21]。为了更好地研究侵蚀的发育过程,主要对细沟长的变化过程进行监测。

60 mm/h 雨强下,24 min 40 s 在 2 号槽的第 8、9 级田坎内侧发现细沟,沟长 12 cm,73 min 在 1 号槽第 9 级梯田坎内侧发现细沟,沟长 9 cm,细沟发育深浅不一。85 min 观察到 2 号槽田面上的细颗粒土体基本被冲刷流失,114 min 观察到 1 号槽田面细颗粒基本冲刷流失,大量碎石露出。降雨结束时观察到 2 号槽内 1~6 级田面主要以面蚀为主,8、9 级田面细沟发育到长约 42 cm,第 7 级田面发育有长约 5 cm 左右细沟,3 号槽内第 9 级梯田面也观察到长约 21cm 的细沟,此时田面基本出露碎石。沟长平均发育速率为 1 号槽(0.28 cm/min),2 号槽(0.35 cm/min),3 号槽(0.18 cm/min)。3 个槽内每级田埂被冲蚀的程度不一,降雨结束时 1 号槽内第 9 级梯田田埂高度为 23 mm,2 号槽内第 9 级梯田田埂高度为 17 mm,3 号槽内第 9 级梯田田埂高度为 25 mm。上述监测结果表明不注浆工况模型细沟出现更早且发育速度更快。3 种工况模型中细沟发育都符合自上而下其所占比重和侵蚀程度增大的规律。

3.2 体积含水率

60 mm/h 雨强下体积含水率变化见图 5(a)。降雨历时 10 min 内各测点的体积含水率保持不变,此时土壤初始含水率为 25%。由于含水率传感器埋设的深度接近,降雨下渗到达传感器深度用时基本一致,15 min 时湿润锋达到传感器埋设深度,含水率急剧增加,28 min 时增速变缓,降雨结束时 1W1~3W2 依次为 39%、41%、36%、38%、42%、43%。上述监测结果表明注浆工况体积含水率的增速和总增量大于不注浆工况,3 种工况体积含水率变化曲线趋势一致。

3.3 土压力

60 mm/h 雨强下土压力变化见图 5(b)。由于传感器布置位置不同和土体不是完全均质的,所以初始土压力为 5.5~5.9 kPa,观察到坡中土压力小于坡顶。由于梯田模型未发生破坏,所以土压力没有突变,土压力随降雨进行而缓慢上升。上述监测结果表明注浆工况土压力变化量小于不注浆工况。

3.4 孔隙水压力

60 mm/h 雨强下孔隙水压力变化见图 5(c),初始孔隙水压力都为 0。开始降雨 25 min 后传感器开始响应,由于 K2 的埋设深度小于 K1,其响应时

间略早于 K1,表明此时湿润锋已到达传感器位置。湿润锋到达后孔隙水压力迅速增大,约 50 min 时增速趋缓,表明此时梯田内部的孔水压在上部降雨垂直入渗作用和模型内部渗流作用下达到动态平衡。1W1~3W2 的峰值分别为 1.55 kPa、1.21 kPa、0.93 kPa、1.07 kPa、1.21 kPa、1.43 kPa。上述监测结果表明不注浆工况内部的孔水压变化率和变化量都小于注浆工况,但是其变化趋势一致都基本符合缓-陡-缓。

3.5 基质吸力

60 mm/h 雨强下基质吸力变化见图 5(d)。传感器显示的正值为基质吸力,0 代表此处饱和,负值代表孔隙水压力。1J1~3J2 的初始基质吸力为 1.63~4.95 kPa,且由于埋设位置原因 J2 要比 J1 更大,这是因为模型梯田制备好后进行养护的过程中,自由水在土体中下渗,且表层土壤中的水分容易蒸发,使得土体下部含水率偏大,基质吸力偏小。降雨初期传感器显示基质吸力保持稳定,湿润锋到达

后迅速降低,所以其变化趋势为先快速下降然后以一个较小的速率减小到最小值。由于埋设较浅,J2 响应时间较 J1 稍早。1J1~3J2 的吸力最小值分别为 -1.62 kPa、-1.19 kPa、-1.02 kPa、-1.11 kPa、-1.18 kPa、-1.52 kPa,均为负值,表明该位置土体已经产生孔隙水压力。上述监测结果表明降雨后不注浆工况模型基质吸力大于注浆工况。

总的来看,随着降雨进行,模型梯田内部孔隙水压力、土压力、体积含水率都增大,基质吸力随之减小,变化趋势基本符合缓-陡-缓。原因是雨水入渗到传感器位置前其保持稳定,到达后先迅速变化,之后随着降雨持续,土壤含水率进一步增大,入渗率随之减小,且细颗粒土在冲刷作用下运移堵住下渗通道导致土壤入渗能力进一步减弱。注浆梯田模型内传感器相较于不注浆梯田模型其响应时间更早,显示数据的变化率和总变化量也更大,说明注浆后模型田面的下渗强度大于不注浆工况。

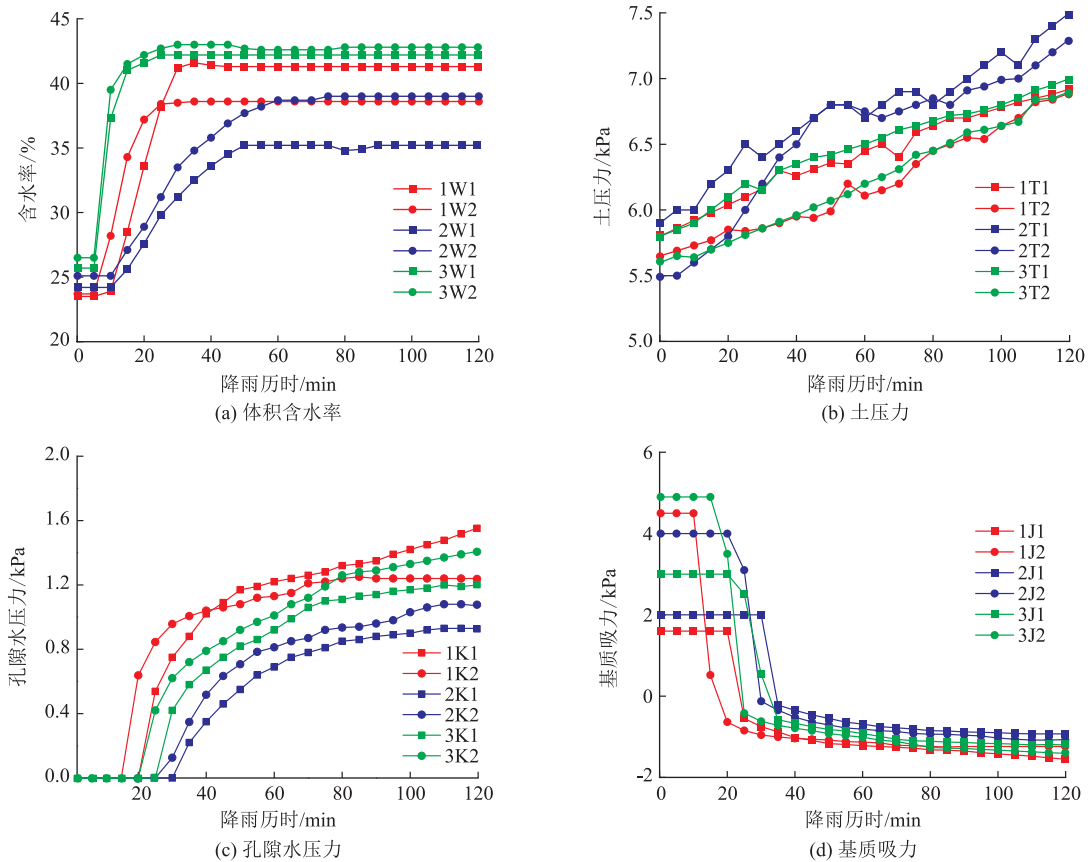


图5 传感器数据

3.6 坡面流速

地表水流速变化见图 6。两种降雨条件下坡面流速变化趋势都是坡面流速在产流后迅速增大,经历波动后逐渐趋于稳定,1~3 号槽在 60 mm/h 降

雨条件下平均坡面流速为 9.5 cm/s、11.7 cm/s、8.4 cm/s,在 120 mm/h 降雨条件下平均坡面流速为 12.5 cm/s、13.6 cm/s、10.2 cm/s,上述两种降雨条件下监测结果表明不注浆梯田模型的平均坡面流

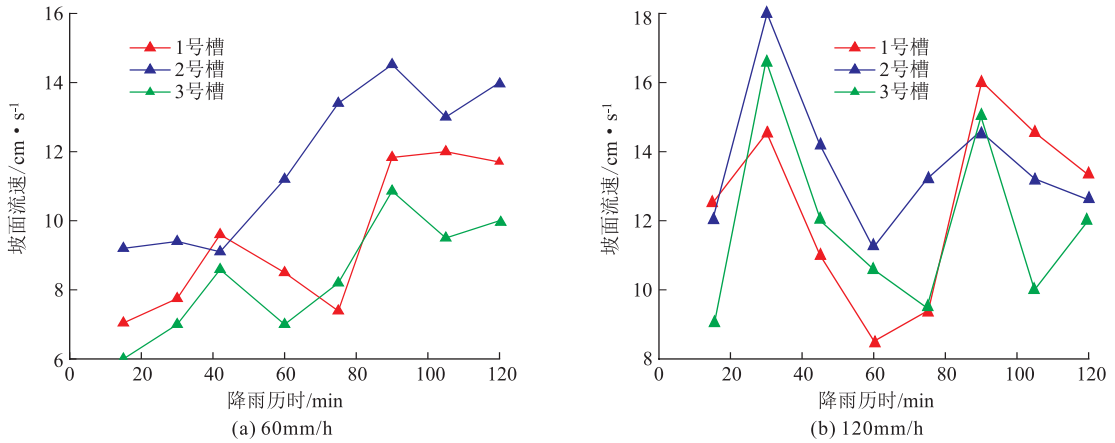


图 6 坡面流速

速、流速峰值大于注浆梯田模型。

3.7 产流速率

产流速率见图 7(a)和图 7(c),随着降雨进行产流速率增大。需要注意的是在计算中考虑到模型槽尺寸,所以 2 号槽的产流产沙数据取 B、C 出水口数据平均值。1~3 号槽在 60 mm/h 雨强下产流时间分别为 13 min 47 s、11 min 50 s、14 min 16 s,在 120 mm/h 雨强下为 8 min 24 s、7 min 36 s、10 min 54 s。60 mm/h 雨强总产流量分别为 67.1 l、77.5 l、

58.4 l,120 mm/h 雨强为 128.2 l、131.8 l、119.3 l。上述两种降雨条件下监测结果表明不注浆工况的平均产流速率、总产流量和产流速率峰值都大于注浆工况,且其产流时间早于注浆工况。

3.8 产沙率

产沙率见图 7(b)和图 7(d)。随着降雨持续产沙率不断增大。1~3 号槽在 60 mm/h 雨强下平均产沙率为 0.62 g/l、1.34 g/l、0.42 g/l。在 120 mm/h 雨强下平均产沙率为 2.22 g/l、2.34 g/l、

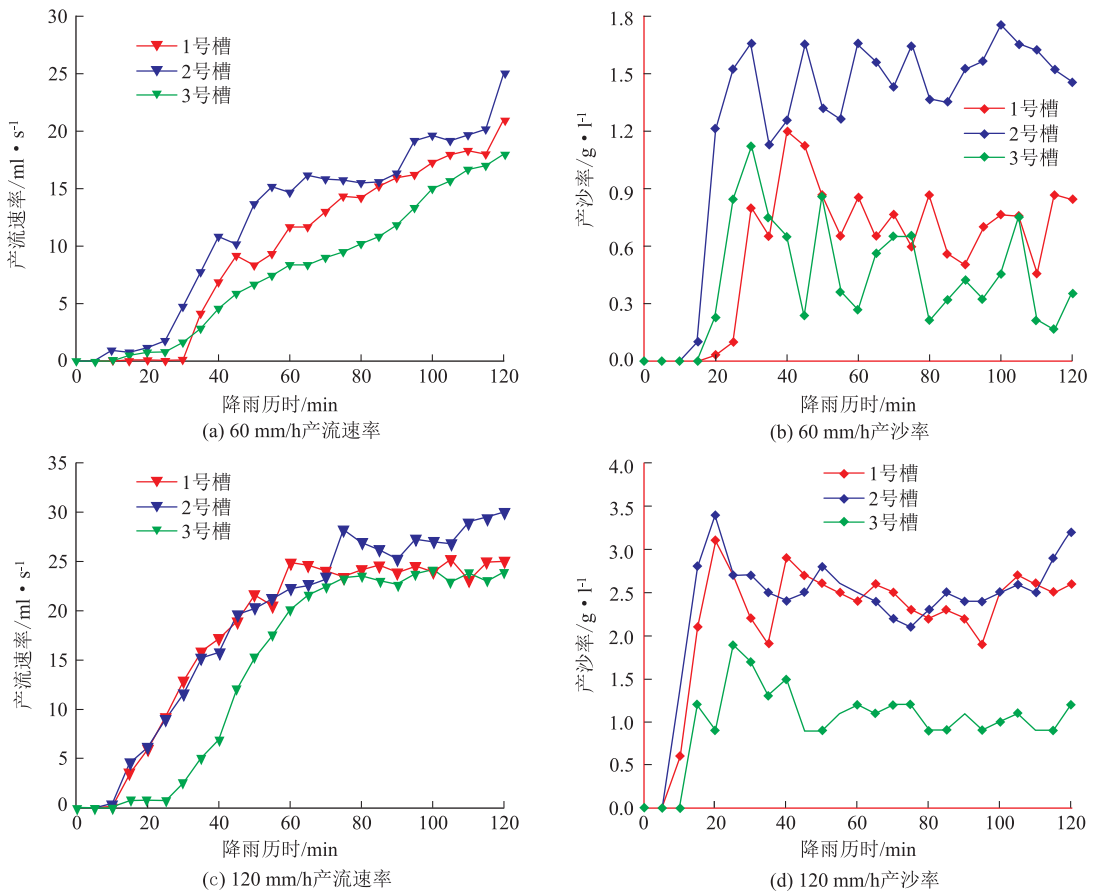


图 7 产流产沙

1.12 g/l。两种降雨条件下监测结果表明不注浆工况的平均产沙率、产沙率峰值、总产沙量都大于注浆工况。

60 mm/h 雨强下,1号槽的产流产沙量为2号槽的81.11%、46.78%,3号槽的产流产沙量为2号槽的65.04%、33.35%。120 mm/h 雨强下,1号槽的产流产沙量为2号槽的94.46%、91.26%,3号槽的产流产沙量为2号槽的76.85%、42.84%。表明注浆固梗对于梯田在降雨条件下具有减流减沙效益。

4 降雨侵蚀机理研究

4.1 多级梯田降雨侵蚀规律

降雨过程中面流形成后,田面侵蚀的程度取决于田面径流势能和梯田的抗蚀能力,田面水流属于典型的薄层流,在流动过程中沿梯度方向产生径流剪切力,坡面上的土壤在径流剪切力的作用下先发生剪切破坏,后被水流搬运,进而发生侵蚀。势能越大水流扰动性越强,坡面径流搬运颗粒的能力越强。

注浆固梗仅影响侵蚀发育速度,对侵蚀发展模式没有影响,这从试验中传感器显示数据、产流产沙和坡面流速变化趋势一致,仅变化出现先后不同这一规律可以得出。梯田降雨侵蚀过程分为以下几个阶段:入渗积水阶段、满溢面蚀阶段、跌坎股流阶段、细沟侵蚀阶段。原因是:降雨初期,由于土壤入渗以及田埂截流作用,田面不会产生地表径流,此时大于入渗强度的雨水都汇集于田面之上,此阶段的侵蚀类型为雨滴溅蚀,即试验中产流时刻之前的阶段。当田面积水高度大于田埂高度时发生满溢,此时坡面流速较慢,此阶段侵蚀类型为面蚀,即降雨初期坡面流速迅速增大的阶段。随着降雨持续,土壤入渗能力降低,地表径流加剧,且由于每级梯田面的汇水面积包括此级梯田以上的所有田面汇水总面积,所以下方梯田面径流量及其流速增大,下方梯田坎处形成径流跌坎,汇聚成的股流冲蚀梯田面形成细沟,这是试验中坡面流速和产流产沙速率波动的阶段,此时的侵蚀类型为下方梯田面开始发育细沟侵蚀,上方田面为面蚀。

4.2 注浆固梗降雨侵蚀机理

注浆固梗对于梯田降雨侵蚀规律的影响主要是通过加强自身的截流作用来实现的。田埂通过机械阻挡田面泥沙以及拦截坡面径流,减少了田面径流量降低了田面的径流势能,使其搬运颗粒能力减弱,增加雨水入渗,减少坡面径流。另一方面田埂减少了田面雨滴溅蚀面积,提高了土壤的抗蚀能力。

由于田埂截流能力是有限的与田埂高度和质量成正比,随着降雨持续,田埂被冲蚀,截留量趋于变小,截留率就会降低,产流产沙速率就增大了。

通过侵蚀发育情况可知3号槽内细沟发育时间最晚,细沟出现时间相较于2号槽延后了95 min,且降雨后其田埂被冲蚀情况也最轻微。通过分析传感器数据可知3号槽内传感器对降雨入渗的响应时间最早,变化率和变化量也最大,说明其降雨的入渗作用最强。通过分析产流产沙数据可知2号槽的产流时间最早,3号槽产流时间最晚,60 mm/h 雨强下0.8水灰比浆液注浆工况的减流减沙比例为13.4%、53.9%,0.5水灰比浆液注浆工况的减流减沙比例为24.6%、68.3%。由于雨强增大田埂损耗率增大截留量减小,所以雨强增大到120 mm/h时,0.8水灰比浆液注浆工况的减流减沙比例为5.5%、8.7%,0.5水灰比浆液注浆工况的减流减沙比例为23.1%、57.0%,相较于60 mm/h 雨强时,0.5水灰比浆液注浆固梗的减流减沙比例减小量小于0.8水灰比浆液注浆固梗工况减流减沙比例减小量。

5 结论

(1) 注浆固梗工况相较于不注浆工况下模型内体积含水率、孔隙水压力、基质吸力传感器的响应时间更早,数据变化率和总变化量也更大,说明注浆固梗增强了田埂截流作用,使雨水下渗强度增加。

(2) 田埂注浆加固仅减缓梯田侵蚀发展速度,而对侵蚀发展模式没有影响。多级水平梯田降雨侵蚀发育模式总结为以下几个阶段:入渗积水阶段、满溢面蚀阶段、跌坎股流阶段、细沟侵蚀阶段。

(3) 不同工况的细沟长平均发育速率不同,表现为0.28 cm/min(0.8水灰比注浆工况)、0.35 cm/min(不注浆工况)、0.18 cm/min(0.5水灰比注浆工况),说明注浆固梗对细沟发育有较好的调控作用。

(4) 降雨条件下梯田注浆固梗具有减流减沙效益,随着雨强增大,注浆固梗减流减沙比例减小。0.5水灰比浆液注浆固梗的减流减沙比例减小量小于0.8水灰比浆液注浆固梗工况减流减沙比例减小量。

参考文献

- [1] 霍云霏,朱冰冰.黄土丘陵区水平梯田保水保土效益分析[J].水土保持研究,2013,20(5):24-28.
- [2] 窦玉青.梯田防止侵蚀的理论分析[J].西北大学学报(自然科学版),2013,43(5):845-849.

- 学版),1988,18(2):95-100.
- [3] Ran Q, Chen X, Hong Y, et al. Impacts of terracing on hydrological processes: A case study from the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 588: 125045.
- [4] 焦菊英,王万中,李靖. 黄土丘陵区不同降雨条件下水平梯田的减水减沙效益分析[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 59-63.
- [5] 吴发启,张玉斌,王健. 黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 34-37.
- [6] 徐乃民,张金慧. 水平梯田蓄水减沙效益计算探讨[J]. 中国水土保持, 1993, 14(3): 36-38.
- [7] 邵生俊,杨春鸣,马秀婷,等. 黄土的独立性指标及其与湿陷性参数的相关性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(S2): 27-34.
- [8] 周家文,徐卫亚,邓俊晔,等. 降雨入渗条件下边坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1066-1073.
- [9] 焦菊英,王万中. 黄土高原水平梯田质量及水土保持效果的分析[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 65-69.
- [10] 温永福. 极端降雨条件下黄土区梯田边坡稳定性模拟试验研究[D]. 西北农林科技大学, 2018.
- [11] 郭振勇. 三峡库区不同类型梯田对降雨产流特征和垂直水文连通性的影响[D]. 华中农业大学, 2022.
- [12] 张凯,孔志岗,李燕清,等. 全风化花岗岩管沟回填土坡面侵蚀影响因素及交互作用[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 52-58.
- [13] Shen H, Zheng F, Wen L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope [J]. Soil & Tillage Research, 2016, 155: 429-436.
- [14] Zuazo D V, Ruiz A J, Raya M A, et al. Impact of erosion in the taluses of subtropical orchard terraces [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004, 107(2): 199-210.
- [15] 刘斌涛,宋春风,史展,等. 西南土石山区水平梯田的水土保持措施因子[J]. 中国水土保持, 2015, 36(4): 36-39.
- [16] 严登峰. 果园不同水土保持措施控制氮磷流失效果的研究[D]. 福建农林大学, 2007.
- [17] 蒋荣,张兴奇,张科利,等. 喀斯特地区不同林草植被的减流减沙作用[J]. 水土保持通报, 2013, 33(01): 18-22.
- [18] 徐佳,刘普灵,邓瑞芬,等. 黄土坡面不同植被恢复阶段的减流减沙效益研究[J]. 地理科学, 2012, 32(11): 1391-1396.
- [19] 董敬兵,时鹏,李占斌,等. 植被和梯田措施对坡沟系统细沟侵蚀调控作用[J]. 农业工程学报, 2022, 38(20): 96-104.
- [20] Qin C, Zheng F, Wilson V G, et al. Apportioning contributions of individual rill erosion processes and their interactions on loessial hillslopes[J]. Catena, 2019, 181: 104099.
- [21] 温永福,高鹏,穆兴民,等. 黄土高原丘陵沟壑区梯田边坡侵蚀过程对雨强的响应[J]. 泥沙研究, 2017, 42(06): 46-51.

作者简介: 黄博(1998—),男,云南个旧人,硕士研究生,主要从事工程地质和灾害防治研究。E-mail:1771726896@qq.com

通讯作者: 陈安(1971—),男,河南潢川人,博士,高级工程师,主要研究方向为水文地质、工程地质、环境地质及地下工程水害防治。E-mail:373034075@qq.com

《地质灾害与环境保护》征稿启事

本刊主管单位:四川省教育厅;主办单位:成都理工大学、地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室。学术性期刊,季刊。1990年9月创刊,国内外公开发行人。本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”,“万方数据网络系统(ChinaInfo)数字化期刊群”,“中文科技期刊数据库”。欢迎投稿,欢迎订阅。

征稿内容: 自然灾害(特别是地质灾害)与人为灾害防治,生态环境、资源环境和地质环境保护,水文地质与工程地质,岩土工程与工程勘察,与本学科有关的边缘和交叉学科等方面的优秀论文,最新科技成果,新理论、新方法、新技术研讨,及工程技术经验总结,新成就、新动向方面的综述、述评,新书刊、新设备评介等。

来稿注意事项: (1) 每篇稿件一般以中文6000字为宜,最多不超过8000字(包括图表等所占版面字数)。(2) 每篇稿件必须有:中英文篇名、摘要(摘要以第三人称书写,200字左右)、图表名,所在单位中英文名称;第一作者简介,主要包括:姓名、性别、出生年、职务、职称,最高学历、专业、研究方向,主要科技成果及其获奖情况,以及出版专著、发表论文等简况。(3) 来稿请交电子文档,另可附打印件1份,可电子邮件投稿,地址:dzzh@cdut.edu.cn。

《地质灾害与环境保护》编辑部

2024年6月25日